

BIORREMEDIACIÓN Y SU IMPORTANCIA EN LOS ECOSISTEMAS

D.A. Valdez Saldaña, S.M. Salcedo Martínez*
y A. Rocha Estrada

Universidad Autónoma de Nuevo León,
Facultad de Ciencias Biológicas, Departamento de Botánica
Ave. Pedro de Alba s/n, Cd. Universitaria,
San Nicolás de los Garza, N.L. México. 66455.
*sergio.salcedomr@uanl.edu.mx.

Resumen

En el control de la contaminación ambiental la biorremediación es una herramienta efectiva que utiliza los organismos y sus capacidades metabólicas para estabilizar, volatilizar, degradar o acumular contaminantes en agua, suelo o aire. Mientras las técnicas de bioestimulación y bioaumentación utilizan bacterias, hongos o microalgas para degradar contaminantes, la fitorremediación emplea plantas para inmovilizarlos en la rizosfera, absorberlos y secuestrarlos o degradarlos en sus tejidos o absorberlos y volatilizarlos por las hojas. Las algas de rápido crecimiento, con alta tolerancia a los contaminantes al concentrarlos o degradarlos pueden también ser utilizadas para adsorber, estabilizar, degradar o acumular contaminantes, en este caso se prefieren especies fáciles de cosechar y de las que se puedan obtener metabolitos comercialmente valiosos.

Palabras clave: Bioestimulación, bioaumentación, fitorremediación, ficorremediación

Biorremediación

La biorremediación, es un proceso que utiliza las capacidades biológicas de los organismos vivos para degradar contaminantes en el medio ambiente, tanto en ecosistemas terrestres como acuáticos. En el control de la contaminación ambiental la biorremediación es una herramienta cuya versatilidad depende de la biodiversidad y las facultades de las especies para lidiar

con distintos contaminantes, tales como hidrocarburos, aguas residuales, pesticidas y hasta gases tóxicos. El enfoque central es la utilización de organismos que se han adaptado a distintos ambientes donde transforman contaminantes en productos menos tóxicos que se reincorporan a los sistemas biogeoquímicos naturales. Los grupos de organismos que más exitosamente se han utilizado en biorremediación en ambientes terrestres son las bacterias, los hongos y las plantas, mientras que en ambientes acuáticos se emplean las algas en derrames accidentales o para el tratamiento de aguas con descargas agrícolas, domésticas e industriales (Garbisu *et al.*, 2002; Salcedo-Martínez *et al.*, 2019).

Consideraciones en el proceso de biorremediación

Dentro de los elementos a considerar al implementar un proceso de biorremediación se cuentan: el contaminante, el tipo de sistema, que puede ser terrestre, acuático o aéreo, así como el sitio donde se llevará a cabo el proceso, ya sea el mismo lugar donde se presenta el contaminante (in situ) o trasladando el medio contaminado (agua, suelo o aire) a un sitio diferente (ex situ), donde se puede tener más control de las variables ambientales durante el tratamiento (Figura 1). Enseguida se deberá determinar el proceso o técnica más adecuado para lograr los resultados esperados,



Figura 1. Tipos de Biorremediación.

para lo cual se toma en cuenta el tipo de contaminante, el área afectada, el presupuesto y tiempo disponibles.

Técnicas en biorremediación

Una de las técnicas más utilizadas para la biorremediación es la bioestimulación, que consiste en favorecer el crecimiento y/o metabolismo de microorganismos (bacterias u hongos) que son capaces de biorremediar (comúnmente degradar un contaminante en) un área determinada, lo cual se logra mediante la adición de nutrientes y aceptores de electrones como nitrógeno, fósforo, carbón y el oxígeno (Elektorowicz, 1994; Rhykerd *et al.*, 1999; Piehler *et al.*, 1999). La principal ventaja de esta estrategia es que utiliza los microorganismos nativos de la zona los cuales están bien adaptados al ambiente del subsuelo. Una de las condiciones a considerar al emplear esta la técnica es la litología del subsuelo, ya que la presencia de arcillas compactas o

algún material de grano fino favorece el que se mantengan los aditivos dentro de la zona tratada, restringiendo su expansión fuera de la zona contaminada; mientras que la presencia de fracturas favorece la filtración de los aditivos en rutas que rompen su distribución uniforme. También hay que tener presente que al agregar nutrientes al subsuelo se promoverá tanto el desarrollo de los microorganismos útiles como el de otros heterótrofos sin propiedades degradadoras, con los cuales se establecerá una competencia por los nutrientes que restará eficiencia al proceso de biorremediación (Adams, 2014). Otra técnica de biorremediación es la bioaumentación, que se ha usado como estrategia alternativa para la degradación de materia orgánica en exceso o petróleo elevando significativamente la cantidad de microorganismos y adicionando enzimas asegurando la degradación y reduciendo el tiempo necesario para realizarla. Muchas veces se realiza culti-

vando microorganismos autóctonos, en cuyo caso el éxito con esta técnica depende de la capacidad que tengan los microorganismos nativos para degradar la mayoría de los componentes del petróleo (Leahy y Colwell, 1990), mientras mantienen su viabilidad, estabilidad genética, alta sobrevivencia y competitividad en entornos hostiles, mientras se desplazan por los poros a través del sedimento para llegar a los contaminantes (Goldstein *et al.*, 1985). Una tercera técnica usada en biorremediación es la fitorremediación, es versátil pues emplea las capacidades de plantas y los microorganismos asociados a su rizosfera, como bacterias, hongos y microalgas para estabilizar, volatilizar, degradar o acumular contaminantes, este proceso utiliza la fisiología natural de las especies que en uno o varios ciclos naturales pueden lograr una limpieza eficaz de uno o varios contaminantes, orgánicos o inorgánicos, en suelo, aire o agua (Tabla 1).

Dentro de la amplia gama de contaminantes orgánicos e inorgánicos de origen antropogénico que llegan al ambiente, muchos se consideran tóxicos y se liberan de distintas fuentes. Tal es el caso de los pesticidas y her-

bicidas usados en la agricultura; solventes, combustibles, plásticos, asfalto y otros hidrocarburos de la industria petroquímica; armas químicas y explosivos desarrollados como armamento y metales pesados liberados por la minería, la industria y los vehículos automotores. Por mencionar algunos ejemplos, entre los contaminantes orgánicos más comunes (Tabla 2), se tiene el tricloroetileno (TCE) que es un solvente utilizado para la remoción de grasa en metales y se encuentra generalmente en las aguas subterráneas (Newman *et al.*, 1997; Shang *et al.*, 2003). Por otro lado, dentro de los contaminantes inorgánicos se presentan elementos naturales en la atmosfera o en la corteza terrestre y los de origen antropogénico producidos por la industria, minería y el tráfico de automóviles, que generalmente resultan tóxicos (Nriagu, 1979). Los contaminantes inorgánicos no se pueden degradar, pero si pueden ser secuestrados del suelo por la rizosfera o absorbidos y estabilizados en los tejidos vegetales (fitoestabilización) o reducirse su biodisponibilidad por compuestos químicos secretados por la raíz, fitoinmovilización (Figura 2). Estos contaminantes inorgánicos incluyen macronutrientes vegetales como nitrato y fosfato, oligoelemen-

Tabla 1. Mecanismos de fitorremediación.

Proceso	Mecanismo	Contaminante	Referencia
Fitoestimulación	Los exudados de las raíces de las plantas estimulan el crecimiento de microorganismos del suelo capaces de degradar los contami-	Orgánicos	Molina-Romero <i>et al.</i> , 2015
Fitovolatilización	Volatilizan o evaporan contaminantes que se encuentran en el agua, sedimentos o el suelo a través de las hojas.	Orgánicos e inorgánicos	López <i>et al.</i> , 2004
Fitoestabilización	Reduce los contaminantes en el ambiente por acumulación en raíces o precipitación en la rizosfera	Orgánicos e inorgánicos	Domínguez, 2016
Fitoextracción	Utiliza la capacidad de algunas plantas para acumular contaminantes en tallos o follaje.	Inorgánicos	López <i>et al.</i> , 2004
Rizofiltración	Utiliza las raíces de las plantas en cultivo hidropónico para absorber, adsorber y concentrar los contaminantes del agua.	Orgánicos e inorgánicos	López <i>et al.</i> , 2004

Tabla 2. Contaminantes orgánicos que se tratan con la fitorremediación.

Contaminante	Planta	Efecto	Referencia
Tricloroetileno (TCE)	<i>Populus spp</i>	Degradación por metabolismo	Ma & Burken, 2003
Perclorato	<i>Nicotiana tabacum</i>	Degradación por metabolismo	Sundberg <i>et al.</i> , 2003
Hidrocarburos de petróleo	<i>Vetiveria zizanoides</i>	Remediación	Brandt <i>et al.</i> , 2006
Metileter butiléter	<i>Populus spp</i>	Volatilización	Ma <i>et al.</i> , 2004
Fenol y clorofenoles	<i>Daucus carota</i>	Degradación por metabolismo	De Araujo <i>et al.</i> , 2002

tos vegetales como Cr, Cu, Fe, Mn, Mo y Zn, elementos no esenciales como Cd, Co, F, Hg, Se, Pb, V y W e isótopos radiactivos como 238U, 137Cs y 90Sr (Dushenkov & Kapulnik, 2000; Dushenkov, 2003).

Cualidades de las algas para utilizarse en biorremediación

El éxito del uso de las microalgas en fitorremediación depende de tres condiciones: a) deben de tener una alta tasa de crecimiento, b) una alta tolerancia a la variación estacional diurna si es un sistema abierto y c) buena capacidad para formar agregados para una cosecha por simple gravedad (Park *et al.*, 2011). Sería deseable que además contaran con altos niveles de componentes celulares valiosos, por ejemplo, lípidos para generación de biodiesel (Martínez-García, 2008, Abdel-Raouf *et al.*, 2012). Algunas especies que son utilizadas en tratamientos de aguas residuales por su elevada tolerancia al ambiente y altas concentraciones de contaminantes (Tabla 3).

Procesos metabólicos o fisiológicos que permiten la remediación con algas

En el medio acuático los contaminantes inorgánicos pueden ser bioacumulados y los orgánicos biodegradados por las microalgas y cianobacterias, que además son capaces de biotransformar y biodegradar contami-

nantes aromáticos comúnmente encontrados en aguas naturales y residuales, produciendo carbono reducido y nitrógeno que son utilizados por otros microorganismos (Figura 3). De igual forma las algas y cianobacterias son útiles bioindicadoras de la contaminación ambiental y ciertas especies muy susceptibles a ella, son usadas en pruebas de toxicidad (Semple *et al.*, 1999).

Una importante problemática actual es la contaminación por hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs). Estos compuestos forman un grupo de más de 100 sus-

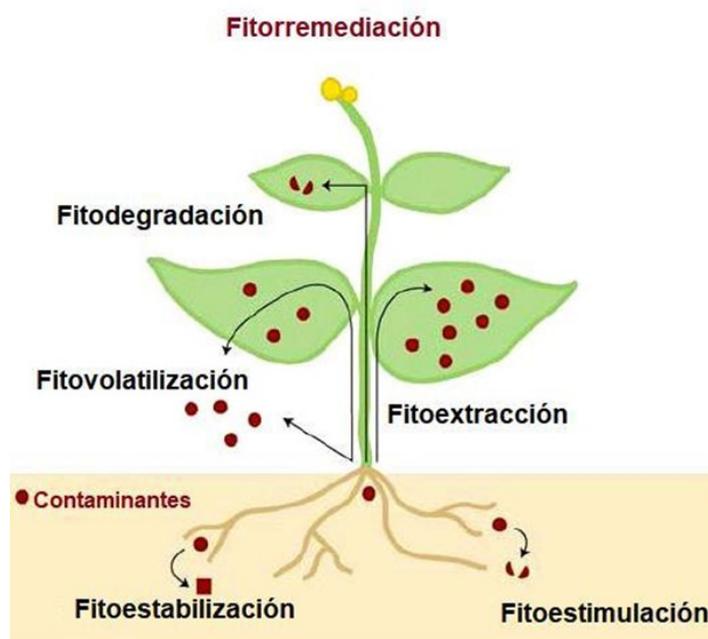
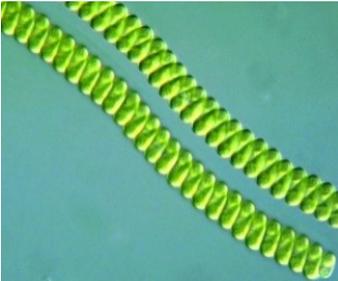
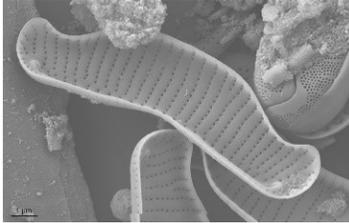
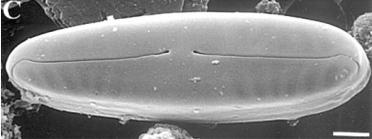
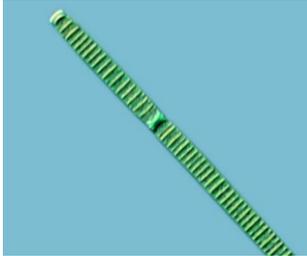
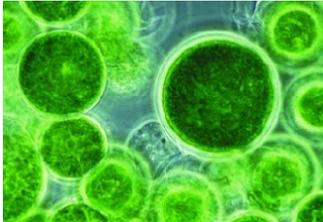
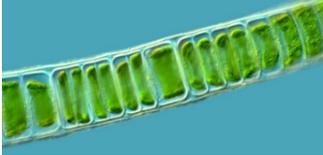


Figura 2. Procesos de fitorremediación

Tabla 3. Microalgas usadas para la remoción de contaminantes.

Especie	Aprovechamiento	Imagen	Referencia
<i>Spirulina</i> sp	-Adsorción de metales -Realcalinización de nutrientes para SRB (biomasa muerta). -Generación de alcalinidad y precipitación de metales.		Phillips <i>et al.</i> , 1995; Rose <i>et al.</i> , 1998; Van-Hille, 1999
<i>Eunotia exigua</i>	Aumento de la producción primaria		Koschorreck <i>et al.</i> , 2002
<i>Pinnularia obscura</i>	Producción primaria		Koschorreck <i>et al.</i> , 2002
<i>Oscillatoria</i> spp	Eliminación de ion SO ₄ , precipitación de metales por el consorcio		Sheoran, & Bhandari, 2005
<i>Chlorella ellipsoidea</i>	Potencial biorremediador		Mitman & Tucci (2005)
<i>Chlamydomonas</i> sp	Aumento de la producción primaria		Fyson <i>et al.</i> , 2006
<i>Ulothrix</i> sp	Absorción de metal		Orandi <i>et al.</i> , 2012

tancias químicas diferentes que se forman durante la combustión incompleta del carbón, gasolina, petróleo y tabaco o la cocción de carne en parrillas, donde generalmente se forman dos o más de ellos, por ejemplo, en el hollín (López *et al.*, 2016). Algunos HAPs son de manufacturación, puros son sólidos incoloros, amarillo-verde o blancos, se encuentran en el petróleo crudo, alquitrán, alquitrán para techado y la creosota. También algunos se usan para medicamentos o la fabricación de pesticidas y tinturas (Arias *et al.*, 2019). Se ha demostrado que la utilización de organismos fotosintéticos ha oxidado estos compuestos orgánicos (Cerniglia *et al.*, 1980).

En México se ha utilizado *Spirulina maxima* para remover HPAs utilizando fenantreno como modelo (Grupo de Biotecnología de Microalgas del CINVESTAV). Aunque es un compuesto altamente tóxico para los organismos acuáticos se logró una remoción moderada del contaminante mientras la exposición no afectó de manera directa al crecimiento o el contenido proteico de la cianobacteria, pero si la clorofila. Las tendencias de investigación sobre biorremediación de aguas contaminadas con hidrocarburos utilizando microalgas y cianobacterias, actualmente se enfocan en el aislamiento in situ de microalgas degradadoras; el uso de pigmentos de microalgas como biomarcadores de contaminación; el análisis de las enzimas involucradas en procesos de remoción de contaminantes, y el diseño de reactores para el tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos. Sin embargo, existen escasas aportaciones sobre el diseño de equipo para remover compuestos orgánicos de aguas residuales industriales en condiciones de cultivo apropiadas para el crecimiento y actividad de las microalgas (Ferrera-Cerrato *et al.*, 2006).

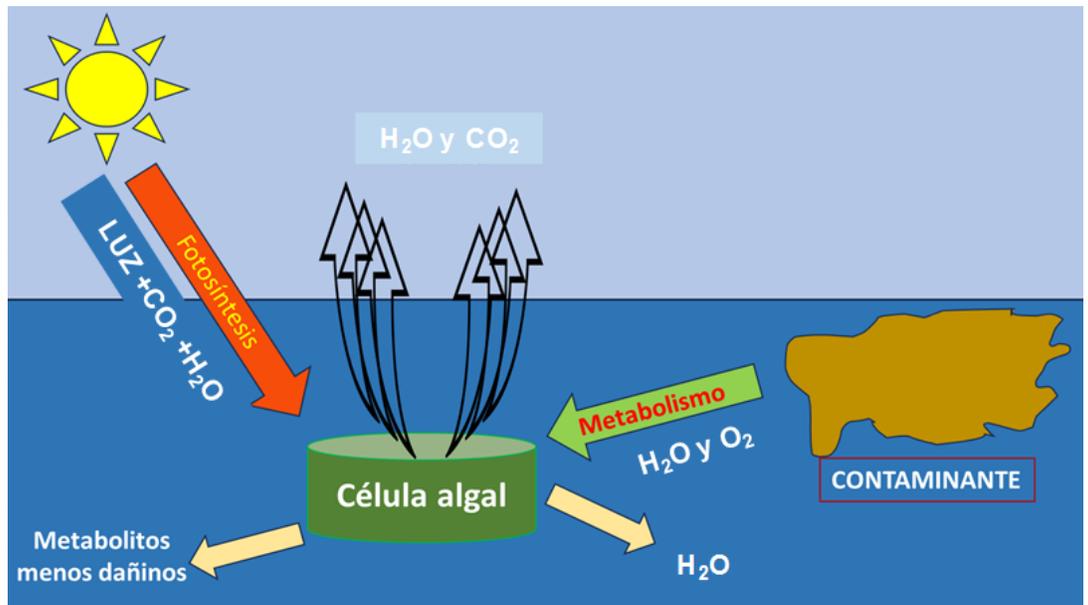


Figura 3. Biorremediación con algas.

Referencias

- Abdel-Raouf N., Al-Homaidan A.A. & Ibraheem I.B.M. 2012. Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19: 257-275.
- Adams G.O., Tawari-Fufeyin P. & Igelenyah E. 2014. Bioremediation of spent oil contaminated soils using poultry litter. *Research Journal in Engineering and Applied Sciences*, 3(2): 124-30
- Arias A.H., Villalón T.R., Orazi M., Ronda A.C. & Marcovecchio J. 2019. Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en ambientes marinos: Una revisión de América. *JAINA, Costas y Mares ante el Cambio Climático*, 1(2): 19-40.
- Brandt R., Merkl N., Schultze-Kraft R., Infante C. & Broll G. 2006. Potential of vetiver (*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash) for phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils in Venezuela. *International Journal of Phytoremediation*, 8(4): 273-284.
- Cerniglia C.E., Van Baalen C. & Gibson D.T. 1980. Metabolism of naphthalene by the cyanobacterium *Oscillatoria* sp., strain JCM. *Microbiology*, 116(2): 485-494.
- De Araujo B.S., Charlwood B.V. & Pletsch M. 2002. Tolerance and metabolism of phenol and chloroderivatives by hairy root cultures of *Daucus carota* L. *Environmental Pollution*, 117(2): 329-335.
- Domínguez M.T. 2016. SPA Fitoestabilización de suelos contaminados. WOCAT. Disponible en línea en WOCAT_QT_Summary-T_SPA027es.pdf (csic.es)
- Dushenkov S. 2003. Trends in phytoremediation of radionuclides. *Plant Soil*, 249: 167-175
- Dushenkov S & Kapulnik Y. 2000. Phytofiltration of metals. *New*

York: Wiley In *Phytoremediation of toxic metals. Using plants to clean up the environment*, 89-106.

Elektorowicz M. 1994. Bioremediation of petroleum contaminated clayey soil with pretreatment. *Environmental Technology*, 15: 373-380.

Ferrera-Cerrato R., Rojas-Avelizapa N.G., Poggi-Varaldo H.M., Alarcón A. & Cañizares-Villanueva R.O. 2006. Procesos de biorremediación de suelo y agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 48(2): 179-187.

Garbisu C., Amézaga I. & Alkorta I. 2002. Biorremediación y ecología. *Ecosistemas*, 11(3): 1-2.

Goldstein R.M., Mallory L.M., Alexander M. 1985. Reasons for possible failure of inoculation to enhance biodegradation. *Applied and Environmental Microbiology*, 50: 977-983.

Koschorreck M., Frommichen R., Herzsprung P., Tittel J. & Wendt-Potthoff K. 2002. Function of straw for in situ remediation of acidic mining lakes. *Water, Air Soil Pollut*, 2: 97-109.

Leahy J.G. & Colwell R.R. 1990. Microbial Degradation of hydrocarbons in the environment. *Microbial Reviews*, 53(3): 305-315.

López R.A.N., Vong Y.M., Borges R.O. & Olguín E.J. 2004. Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Revista Ciencia*, 69-83.

Pérez-Morales López G., Morales Gómez P. & Haza Duaso A.I. 2016. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) (I). Toxicity, population exposure and foods involved. *Revista Complutense de Ciencias Veterinarias*, 10(1): 3-15.

Ma X. & Burken J.G. 2003. TCE diffusion to the atmosphere in phytoremediation applications. *Environmental science & technology*, 37(11): 2534-2539.

Ma X., Richter A.R., Albers S. & Burken J.G. 2004. Phytoremediation of MTBE with hybrid poplar trees. *International Journal of Phytoremediation*, 6(2): 157-167.

Martínez-García L. 2008. Eliminación de CO₂ con microalgas autóctonas. Tesis Doctoral, Instituto de Recursos Naturales, Universidad de León, León. 226.

Mitman G. & Tucci N. 2005. Algal bioremediation of the Berkeley pit lake system- An in-situ test using limnocorrals. EPA (Environmental Protection Agency), (PDF) *Algal Bioremediation of the Berkeley Pit Lake System- An In-Situ Test Using Limnocorrals* (researchgate.net)

Molina-Romero D., Bustillos-Cristales M.D.R., Rodríguez-Andrade O., Morales-García Y.E., Santiago-Saenz Y., Castañeda-Lucio M. & Muñoz-Rojas J. 2015. Mecanismos de fitoestimulación por rizobacterias, aislamientos en América y potencial biotecnológico. *Biológicas*, 17(2): 24-34.

Newman L.A, Strand S.E, Choe N., Duffy J. & Ekuon G. 1997. Uptake and biotransformation of trichloroethylene by hybrid poplars. *Environmental Science Technology*, 31: 1062

Nriagu J.O. 1979. Global inventory of natural and anthropogenic emissions of trace metals to the atmosphere. *Nature*, 279: 409-11.

Orandi S. Lewis D.M. & Moheimani N.R. 2012. Biofilm establishment and heavy metal removal capacity of an indigenous mining algal-microbial consortium in a photo-rotating biological contactor, *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 39(9): 1321-1331.

Park J., Craggs R. & Shilton A. 2011. Recycling algae to improve species control and harvest efficiency from a high rate algal pond. *Water Research*, 45: 6637-6649.

Phillips P., Bender J., Simms R., Rodriguez-Eaton S. & Britt C. 1995. Manganese removal from acid coal-mine drainage by a pond containing green algae and microbial mat. *Water Science Technology*, 31 (12): 161-170.

Piehler M.F., Swistak J.G., Pinckney J.L. & Paerl H.W. 1999. Stimulation of diesel fuel iododegradation by indigenous nitrogen fixing bacterial consortia. *Microbial Ecology*, 38: 69-78.

Rhykerd R.L, Crews B., McInnes K.J. & Weaver R.W. 1999. Impact of bulking agents, forced aeration and tillage on remediation of oil contaminated soil. *Bioresources Technology*, 67: 279-285.

Rose P.D., Boshoff G.A., Wallace L.C.M., Dunn K.M. & Duncan J.R. 1998. An integrated algal sulphate reducing high rate ponding process for the treatment of acid mine drainage wastewaters. *Biodegradation* 9: 247-257.

Salcedo-Martínez S.M., Moreno-Limón S. & Rocha-Estrada A. 2019. Biorremediación con algas. *PLANTA*, 15(26): 24-29.

Semple K.T., Cain B.R. & Schmidt S. 1999. Biodegradation of aromatic compounds by microalgae. *FEMS Microbiological Letters*, 170: 291-300

Shang T.Q., Newman L.A. & Gordon M.P. 2003. Fate of trichloroethylene in terrestrial plants. In *Phytoremediation: New York: Wile: Transformation and control of contaminants*, ed. S.C McCutcheon, J.L Schnoor, 529.

Sheoran A.S. & Bhandari S. 2005. Treatment of mine water by a microbial mat: bench scale experiments. *Mine Water Environment* 24: 38-42.

Sundberg S.E., Ellington J.J., Evans J.J., Keys D.A. & Fisher J.W. 2003. Accumulation of perchlorate in tobacco plants: development of a plant kinetic model. *Journal of Environmental Monitoring*, 5(3): 505-512.

Van-Hille R.P., Boshoff G.A., Rose P.D. & Duncan J.R. 1999. A continuous process for the biological treatment of heavy metal contaminated acid mine water. *Resources Conserving and Recycling*, 27 (1): 157-167.

